

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

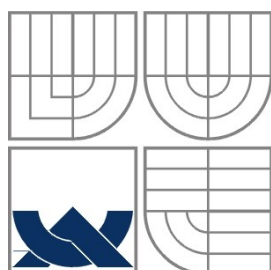
VÝPOČET NÁHRADNÍCH PARAMETRŮ ELEKTRICKÝCH STROJŮ
POMOCÍ METODY KONEČNÝCH PRVKŮ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

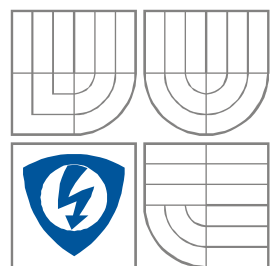
JAN MICHALICZEK

BRNO 2011



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNologiÍ

ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY
A ELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC
ENGINEERING

VÝPOČET NÁHRADNÍCH PARAMETRŮ ELEKTRICKÝCH STROJŮ POMOCÍ METODY KONEČNÝCH PRVKŮ

CALCULATION OF EQUIVALENT CIRCUIT PARAMETERS WITH FINITE ELEMENT METHOD
FOR ELECTRICAL MACHINE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

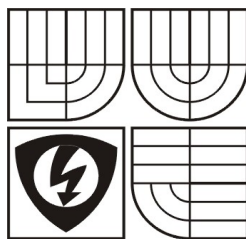
JAN MICHALICZEK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. ROSTISLAV HUZLÍK

BRNO, 2011



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechnikv
a komunikačních technologií

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika

Student: Jan Michaliczek

Ročník: 3

ID: 106638

Akademický rok: 2010/11

NÁZEV TÉMATU:

Výpočet náhradních parametrů elektrických strojů pomocí metody konečných prvků

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Seznamte se s konstrukcí a matematickým modelem synchronního stroje s permanentními magnety
2. V programu FEMM vytvořte model synchronního motoru s permanentními magnety.
3. Vypočtete hodnoty náhradních parametrů synchronního stroje pro různé situace.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Dle pokynů vedoucího

Termín zadání: 23.9.2010

Termín odevzdání: 30.05.2011

Vedoucí práce: Ing. Rostislav Huzlík

Konzultanti bakalářské práce:

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor semestrální práce nesmí při vytváření semestrální práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

Abstrakt

Tato práce slouží k seznámení s konstrukcí a matematickým modelem synchronního stroje s permanentními magnety. Cílem je vytvořit model synchronního motoru s permanentními magnety v programu FEMM, který vyhodnocuje úlohy pomocí metody konečných prvků, a na základě řešení modelu pro různé proudy a různé zatěžné úhly určit jeho náhradní parametry.

Abstract

This thesis serves as introduction to construction and mathematic model of the permanent magnet synchronous machine. The goal is to create a model of permanent magnet synchronous motor in program FEMM, which evaluates problems with the help of finite element method, and based on the solutions of the model for different currents and different load angles determine his equivalent circuit parameters.

Klíčová slova

FEMM; metoda konečných prvků; synchronní motor s permanentními magnety; Simulink

Keywords

FEMM; finite element method; permanent magnet synchronous motor; Simulink

Bibliografická citace

MICHALICZEK, J. *Výpočet náhradních parametrů elektrických strojů pomocí metody konečných prvků*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 39 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Rostislav Huzlík.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma *Výpočet náhradních parametrů elektrických strojů pomocí metody konečných prvků* jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne

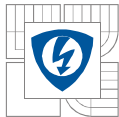
Podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Rostislavu Huzlíkovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne

Podpis autora

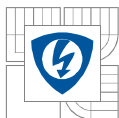


Obsah

1 Úvod.....	13
2 Synchronní motor s permanentními magnety.....	13
2.1 Konstrukce synchronního stroje s permanentními magnety.....	13
2.2 Matematický model.....	15
3 Program FEMM	16
3.1 Analýza metody konečných prvků.....	17
3.2 OctaveFEMM.....	17
3.3 Model synchronního motoru ve FEMMu.....	18
3.3.1 Tvorba modelu – preprocessing.....	19
3.3.2 Výpočty modelu pomocí Octavu.....	23
4 Simulační parametry motoru a jejich výpočet.....	24
4.1 Odpor vinutí na statoru R_s	26
4.2 Podélná indukčnost L_d a příčná indukčnost L_q	27
4.2.1 Podélná indukčnost L_d	27
4.2.1.1 Výpočet indukčnosti L_d pomocí magnetické indukce ve vzduchové mezeře.....	27
4.2.2 Příčná indukčnost L_q	28
4.2.2.1 Výpočet indukčnosti L_q pomocí magnetické indukce ve vzduchové mezeře.....	28
4.3 Výpočet indukčností L_d a L_q v Octavu.....	28
5 Simulink.....	31
5.1 Parkova transformace.....	31
5.2 Blokové schéma.....	34
5.3 Simulace.....	36
6 Závěr.....	38
Literatura.....	39

Seznam obrázků

Obrázek 2.1: Typy rototových konstrukcí.....	14
Obrázek 2.2: Zeslabení charakteristik stroje.....	15
Obrázek 3.1: Kružnice.....	17
Obrázek 3.2: Návrh synchronního motoru s permanentními magnety.....	18
Obrázek 3.3: Knihovna materiálů.....	19
Obrázek 3.4: Okno definování materiálu.....	20
Obrázek 3.5: B-H křivka materiálu M19_29G.....	21
Obrázek 3.6: Vlastnosti bloku	22
Obrázek 3.7: Rozvržení vinutí a natočení magnetů	22
Obrázek 3.8: Model synchronního motoru s permanentními magnety ve FEMMu.....	23
Obrázek 3.9: Řešený model motoru při 120 A s natočením rotoru 0°.....	25
Obrázek 3.10: Řešený model motoru při 120 A s natočením rotoru 50°.....	26
Obrázek 4.1: Průběhy podélné indukčnosti L_d	30
Obrázek 4.2: Průběhy příčné indukčnosti L_q	31
Obrázek 5.1: Prostorový vektor proudu v souřadných soustavách.....	32
Obrázek 5.2: Subsystem Parkovy transformace v Simulinku.....	34
Obrázek 5.3: Subsystem pro transformaci do rotorového souřadného systému	34
Obrázek 5.4: Matematický model synchronního motoru s permanentními magnety.....	35
Obrázek 5.5: Kompletní blokové schéma v Simulinku.....	36
Obrázek 5.6: Graf nasimulovaného časového průběhu proudu I_d motoru.....	37
Obrázek 5.7: Graf nasimulovaného časového průběhu proudu I_q motoru.....	37
Obrázek 5.8: Graf nasimulovaného časového průběhu úhlové rychlosti ω motoru.....	38



Seznam tabulek

Tabulka 5.1: Souřadné soustavy.....	32
-------------------------------------	----

Seznam symbolů a zkratek

Značka	Popis	Jednotka
$ B $	absolutní hodnota magnetické indukce	[T]
B_n, B_{gn}	normálová složka magnetické indukce	[T]
B_t	tangenciální složka magnetické indukce	[T]
B_{1dm}	základní harmonická magnetické indukce d-osy	[T]
B_{1qm}	základní harmonická magnetické indukce q-osy	[T]
d	průměr	[m]
D	vnější průměr rotoru	[m]
H_c	koercivita	[A/m]
i_0	nulová složka proudu	[A]
i_a, i_b, i_c	fázové proudy	[A]
i_s	statorový proud	[A]
i_d, i_{sd}, I_d	realná složka proudu rotorového souřadného systému	[A]
i_q, i_{sq}, I_q	imaginární složka rotorového souřadného systému	[A]
i_{sa}	realná složka proudu statorového souřadného systému	[A]
i_{sb}	imaginární složka proudu statorového souřadného systému	[A]
I_M	amplituda proudu	[A]
J_c	moment setrvačnosti	[kg.m ²]
k_w	koeficient vinutí	[-]
l	délka	[m]
L_d	podélná indukčnost	[H]
L_q	příčná indukčnost	[H]
L_{Fe}	délka motoru	[m]
M_e	elektromagnetický moment	[Nm]
M_L, M_z	zátěžný moment	[Nm]
N	počet závitů	[-]
N_p	počet bodů	[-]
R_s	odpor vinutí na statoru	[Ω]
p	počet pólových dvojic	[-]
S	průřez	[m ²]
t	čas	[s]
u_a, u_b, u_c	fázová napětí	[V]
u_d	realná složka napětí rotorového souřadného systému	[V]
u_q	imaginární složka napětí rotorového souřadného systému	[V]
θ	úhel mezi statorovým a rotorovým souřadným systémem	[°]
θ_z	zátěžný úhel	[°]



μ_r	relativní permeabilita	[-]
μ_x	x-složka relativní permeability	[-]
μ_y	y-složka relativní permeability	[-]
π	Ludolfovo číslo	[-]
ρ	rezistivita	[Ωm]
ρ_{Cu}	rezistivita mědi	[Ωm]
σ	elektrická vodivost	[S/m]
ω	úhlová rychlost	[rad/s]
ϑ_r	úhel rotoru vzhledem k pólové ose	[rad]
$\Delta\vartheta$	krok pootočení motoru	[rad]
Λ_d	podélná složka magnetického toku	[Wb]
Λ_q	příčná složka magnetického toku	[Wb]
Ψ_d	podélná složka spřaženého magnetického toku	[Wb]
Ψ_f	budící spřažený tok	[Wb]
Ψ_q	příčná složka spřaženého magnetického toku	[Wb]
Ω_m	mechanická úhlová rychlost	[rad/s]

1 Úvod

V této práci se budeme zabývat určováním náhradních parametrů synchronního motoru s permanentními magnety. Seznamíme se s konstrukcí stroje a jeho matematickým modelem. Krátce si řekneme něco o programu FEMM a metodě konečných prvků a následně si ve stručnosti vysvětlíme postup tvorby modelu motoru ve FEMMu, který budeme řešit pro různé situace pomocí programu v Octavu. Nakonec si pro zvolené hodnoty náhradních parametrů nasimulujeme nějaké průběhy v Matlabu Simulink.

2 Synchronní motor s permanentními magnety

Synchronní motor s permanentními magnety je typ synchronního motoru, v němž je budící vinutí v rotoru nahrazeno permanentními magnety. Díky novým magnetickým materiálům na bázi sloučenin, jako je například samarium-kobalt (SmCO_5 , SmCO_{17}) nebo neodym-bor-železo (NdBF_e), lze u tohoto typu motoru dosáhnout výkonu v řádech stovek kW. Největší využití mají však v oblasti servomechanismů s nejčastějšími výkony do několika kW.

Statorové vinutí je zapojeno do hvězdy a pro rovnoměrný chod motoru bez momentových pulzací je napájeno harmonickými proudy. K napájení se používá napěťový střídač osazený IGBT tranzistory se zpětnými diodami, který pracuje nejčastěji s pulsně šířkovou modulací.

Motor je taky vybaven resolverem nebo inkrementálním čidlem pro přesné určení okamžité polohy i rychlosti motoru, což je důležité pro jeho řízení.

Pohony s těmito servomechanismy bývají v zahraniční literatuře označovány jako Brushless A. C. Motor Servodrives (neboli bezkartáčové servopohony), nebo PMSM (Permanent Magnet Synchronous Motor) (čerpáno z literatury [4]).

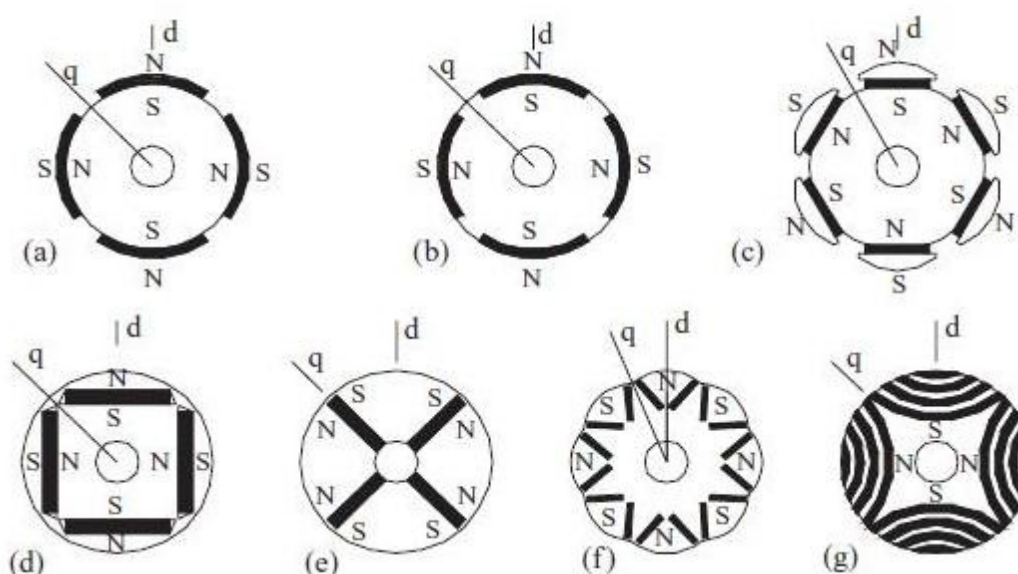
2.1 Konstrukce synchronního stroje s permanentními magnety

Stejně jako u klasického synchronního stroje s vinutým rotorem je na statoru třífázové vinutí. V rotoru jsou umístěny permanentní magnety. Tvar magnetické indukce a tedy i indukovaného napětí je ve vzduchové mezeře harmonický, sinusový.

Permanentní magnety narozdíl od budícího vinutí zajišťují konstantní spřažený tok Ψ_f a nejsou tedy žádné ztráty v buzení. Nevýhodou permanentních magnetů je jejich vodivost, díky které se v nich uplatňují Joulovy ztráty. Buzení permanentních magnetů se nemění, což vznáší určité požadavky na návrh stroje. Jelikož magnety mají velmi nízkou permeabilitu, bývá indukčnost stroje s permanentními magnety malá. Synchronní indukčnost taky musí být malá, protože maximální moment stroje je nepřímo úměrný k synchronní indukčnosti.

Dle literatury [1] se stroje s permanentními magnety rozlišují podle těchto rotorových konstrukcí (viz. obrázek 2.1):

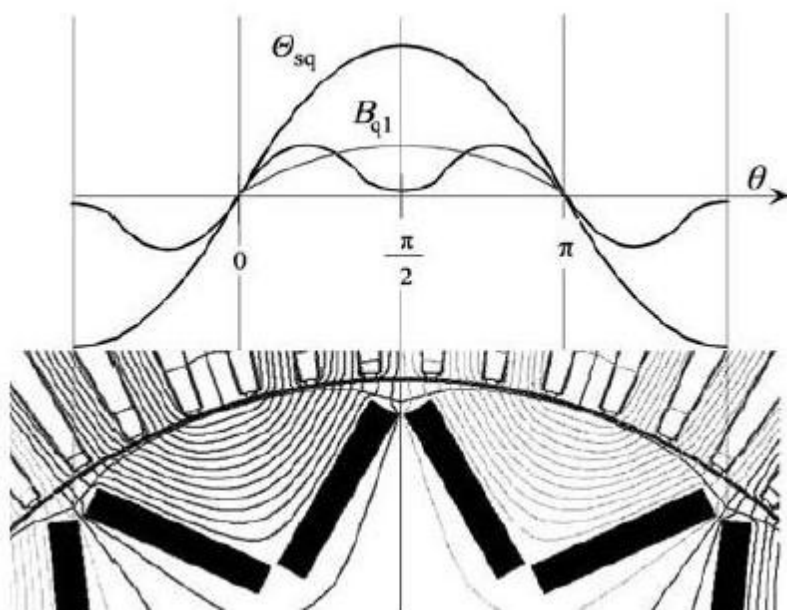
- s magnety namontovanými na povrch rotoru
- s magnety vloženými do povrchu rotoru
- rotor s pólovými nástavci
- s tangenciálně vloženými magnety
- s příčně vloženými magnety
- s dvěma magnety na jeden pól ve V-pozici
- synchronní reluktanční rotor s permanentními magnety



Obrázek 2.1: Typy rotorových konstrukcí [1]

Jsou-li magnety umístěny na povrchu rotoru, je rotor v principu hladký, jelikož relativní permeabilita magnetů je přibližně rovna jedné ($\mu_r = 1,04 - 1,05$). Jsou-li magnety vloženy do rotorové konstrukce, je příčná synchronní indukčnost L_q větší, než podélná synchronní indukčnost L_d . I pro rotor s pólovými nástavci platí podobný poměr indukčností. Takové stroje vytvářejí určitý reluktanční moment.

Úplným vkládáním magnetického materiálu do struktury rotoru se ztrácí podstatná část magnetického toku (asi jedna čtvrtina) magnetu. Magnetický tok je pohlcován konstrukčními součástmi rotoru. Na druhé straně jsou magnety chráněny, jak mechanicky, tak magneticky. V případě úplného vkládání můžeme využít dva magnety na jeden pól (obrázek 2.1 f)), v takovém případě je možné dosáhnout vyšších hodnot magnetické indukce ve vzduchové mezeře při nezátíženém stavu. V případě výskytu železa na povrchu rotoru nastane reakce kotvy, která zeslabuje charakteristiky stroje (obrázek 2.2).



Obrázek 2.2: Zeslabení charakteristik stroje [1]

Stroje s permanentními magnety se uplatňují ve frekvenčních měničích, kde není potřeba žádného tlumení. Tlumícího vinutí je ale zapotřebí v síťových discích. Konstrukce stroje na obrázku 2.1c)-f) jsou nejlepší možnosti k umístění tlumícího vinutí na póly, ale i rotory s magnety na povrchu mohou být vybaveny tlumením (kapitola čerpána z literatury [1]).

2.2 Matematický model

Zjednodušující předpoklady:

- sinusový průběh magnetické indukce i indukovaného napětí ve vzduchové mezeře (uvažován motor s vyniklými póly, tj. s různou magnetickou vodivostí v podélném a příčném směru)
- parametry (odpor R , indukčnost L) jsou konstantní a stejné v každé fázi
- zanedbány ztráty v železe
- absence tlumícího vinutí a zanedbání tlumících účinků materiálu rotoru
- absence nulového vodiče

Rovnice modelu a jejich řešení je vhodné převést do souřadného systému (d , q) spojené s rotorem stroje. Převod je možné provést pomocí Parkovy transformace (viz. Kapitola 5.1.1). Uvedené informace a rovnice jsou převzaty z literatury [4].

Volba proměnných:

- vstupní proměnné – u_d , u_q , M_L
- stavové proměnné – i_d , i_q , Ω_m
- výstupní proměnné – i_d , i_q , M_e

Rovnice pro magnetická spřažení:

$$\Psi_d = L_d i_d + \Psi_f \quad (2.1)$$

$$\Psi_q = L_q i_q \quad (2.2)$$

Napěťové rovnice obecného synchronního stroje i s úpravami dle výše uvedených vztahů:

$$u_d = R_s i_d + \frac{d\Psi_d}{dt} - \omega \Psi_q = R_s i_d + \frac{d(L_d i_d + \Psi_f)}{dt} - \omega \Psi_q = R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega L_q i_q \quad (2.3)$$

$$u_q = R_s i_q + \frac{d\Psi_q}{dt} - \omega \Psi_d = R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} - \omega(L_d i_d + \Psi_f) \quad (2.4)$$

Derivace mechanické rychlosti:

$$p \Omega_m = \frac{1}{J_c} (M_e - M_L) \quad (2.5)$$

Elektromagnetický moment stroje:

$$M_e = \frac{3}{2} p (\Psi_d i_q - \Psi_q i_d) = \frac{3}{2} p [\Psi_f + (L_d - L_q) i_d] i_q \quad (2.6)$$

3 Program FEMM

Program FEMM (Finite Element Method Magnetics) slouží k řešení nízkofrekvenčních elektromagnetických úloh díky dvourozměrným (planárním nebo axiometrickým) modelům a to pomocí metody konečných prvků. V současnosti tento program zahrnuje problematiku (čerpáno z literatury [2]):

- lineárních/nelineárních magnetostatických úloh
- lineárních/nelineárních časově závislých harmonických magnetických úloh
- lineárních elektrostatických úloh
- konstantního tepelného toku

Program FEMM je rozdělen na 3 části:

Interactive shell (femm.exe) – tento program využívá pre-procesoru a post-procesoru pro různé typy úloh řešené programem FEMM. Umožňuje tvorbu geometrických modelů, definování materiálů a mezních podmínek. Lze zde importovat i DXF soubory AutoCADu.

Triangle.exe – rozděluje řešenou oblast na větší počet trojúhelníků, což je důležité k řešení úloh pomocí MKP

Solvers (fkern.exe – pro magnetické úlohy, belasolv – pro elektrostatické úlohy, hsolv – pro úlohy s tepelným tokem, csolv – pro úlohy s proudovým tokem) – každý “řešitel” obsahuje soubory dat popisujících danou problematiku a řeší parciální diferenciální rovnice dané problematiky

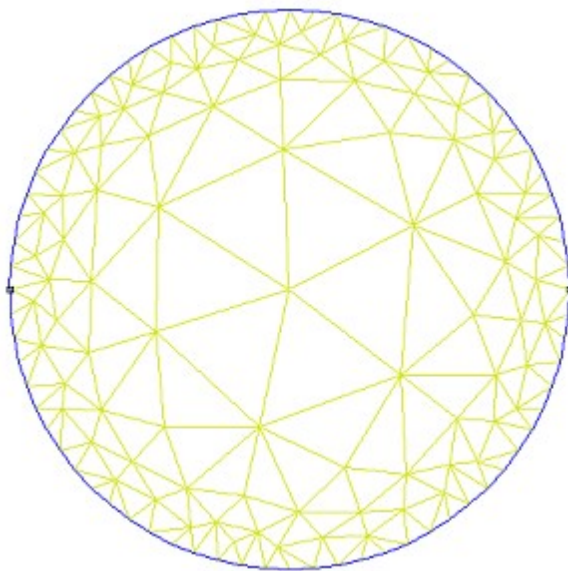
Kapitola byla převzata z literatury [7].

3.1 Analýza metody konečných prvků

Principem metody konečných prvků je rozdělení řešeného celku na velký počet menších částí s jednoduchou geometrií. Například na obrázku 3.1 je znázorněna kružnice rozdělena na trojúhelníky. V těchto jednoduchých polích je „skutečné řešení“ aproximováno velmi jednoduchou funkcí. Čím větší počet polí získáme, tím více se aproximovaný potenciál blíží skutečnému řešení.

Rozdělením celku na menší části přeměníme daný malý obtížnější problém na velký relativně jednodušší problém. Lineární algebra je tvořena z asi desítek-tisíc neznámých. Existují však algoritmy, které danou lineární algebru dokážou vyřešit obvykle během krátké doby.

Program FEMM rozděluje řešené oblasti pomocí trojúhelníkových elementů. Výsledek každého elementu je aproximován lineární interpolací hodnot všech vrcholů trojúhelníku. Lineární algebra je vytvořena minimalizováním velikosti chyby mezi přesnou diferenciální rovnicí a aproximovanou diferenciální rovnicí (převzato z literatury [7]).



Obrázek 3.1: Kružnice

3.2 OctaveFEMM

OctaveFEMM je nástroj, který umožňuje provést operace FEMMu skrze příkazy Matlabu. Nástroj je v podstatě určen programu Octave, jehož jazyk se velmi podobá programovacímu jazyku Matlab i Lua skriptu v samotném FEMMu. Od verze FEMM 4.2 je automaticky instalován s programem a je obvykle umístěn v souboru :

c:\Program Files\femm42\mfiles.

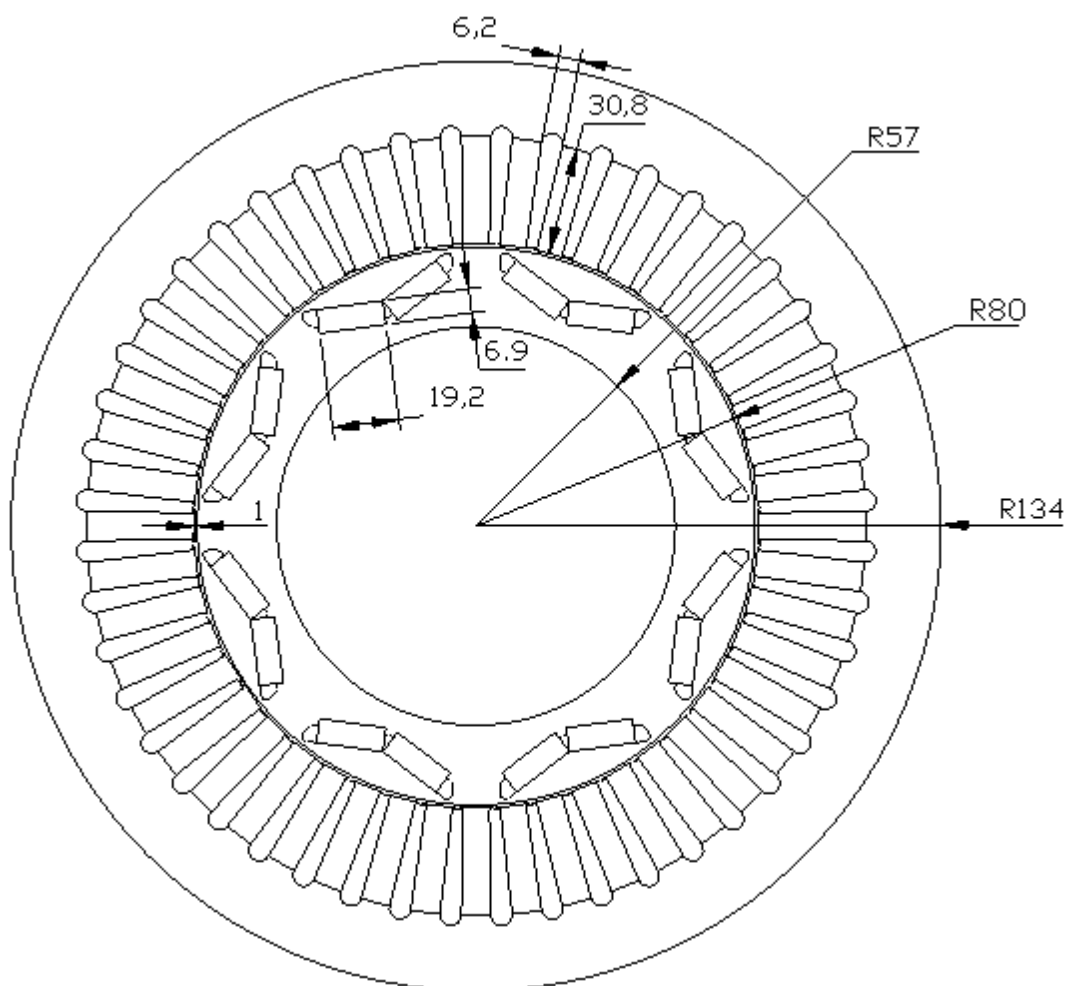
Aby se dal OctaveFEMM používat programem Octave je nutné v Octavu zadat cestu k tomuto nástroji. To se v Octavu provede příkazem:

```
addpath('c:\\progra~1\\femm42\\mfiles');
savepath;
```

Příkazem `openfemm` v Octavu už potom můžeme využívat funkcí tohoto nástroje, příkazem `closefemm` ho zase zavěříme (převzato z literatury [7]).

3.3 Model synchronního motoru ve FEMMu

Model ve FEMMu vychází z náčrtu na obrázku 3.2, kde je zobrazen průřez synchronního motoru s permanentními magnety s typem rotorové konstrukce s dvěma magnety na jeden pól ve V-pozici. Náčrt je sestaven na základě již navrženého motoru Toyota/Prius (literatura [5]). Údaje na obrázku 3.2 jsou uvedeny v milimetrech.



Obrázek 3.2: Návrh synchronního motoru s permanentními magnety

3.3.1 Tvorba modelu – preprocessing

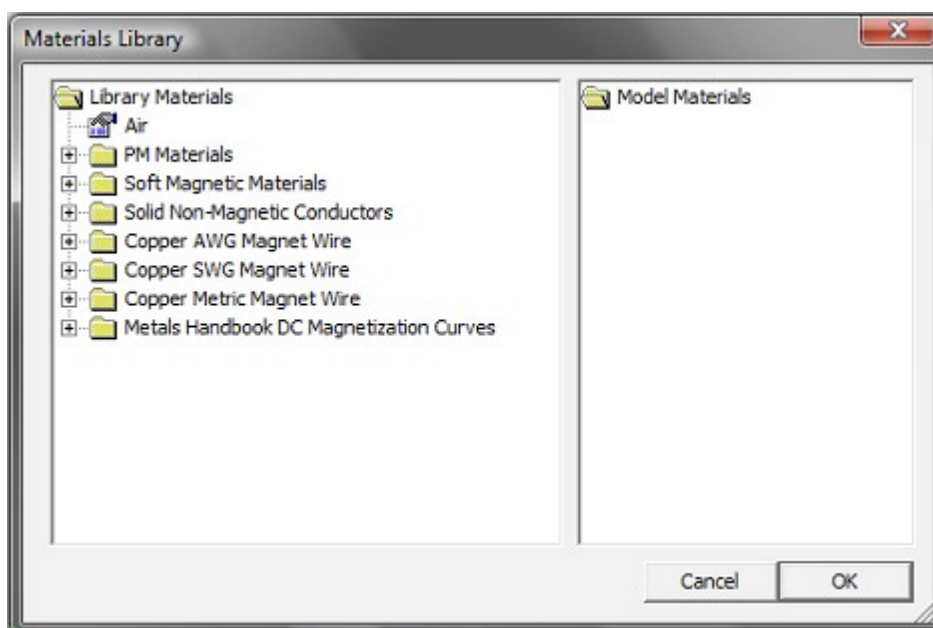
Tvorbou modelu se zabývá tzv. preprocessing programu FEMM, kde se kromě geometrické tvorby setkáme ještě s celou řadou jiných věcí, jako jsou například materiály a jejich definice, cívky (vinutí), jejich umístění apod. Zde se ale budeme pouze věcmi nezbytnými k tvorbě modelu synchronního motoru s permanentními magnety.

Po spuštění programu FEMM zvolíme v záložce „File“ položku „New“. Otevře se nám okno s výběrem úloh k řešení, kde vybereme položku „Magnetics Problem“. Před námi se otevře pracovní plocha, kde můžeme začít s tvorbou modelu. Jelikož geometrická tvorba modelu podle náčrtu (obrázek 3.2) by byla v samotném FEMMu obtížná věc, je jednodušší náčrt vytvořit v AutoCADu a soubor importovat do FEMMu ve formátu DXF. Takto vytvořenou geometrii modelu ve FEMMu potom uzavřeme do kružnice vytvořené ze dvou bodů (položka „Operation“ → „Node“) spojenými dvěma obloukovými čarami („Operation“ → „Arc Segment“).

Nyní je třeba každý uzavřený prostor charakterizovat nějakým materiálem. Ty je ale třeba napřed vybrat nebo nadefinovat v knihovně materiálů. Do knihovny materiálů se dostaneme následovně „Properties“ → „Material Library“. V novém okně (obrázek 3.3) najdeme a vybereme obyčejným přetáhnutím pomocí myši na pravou stranu následující materiály:

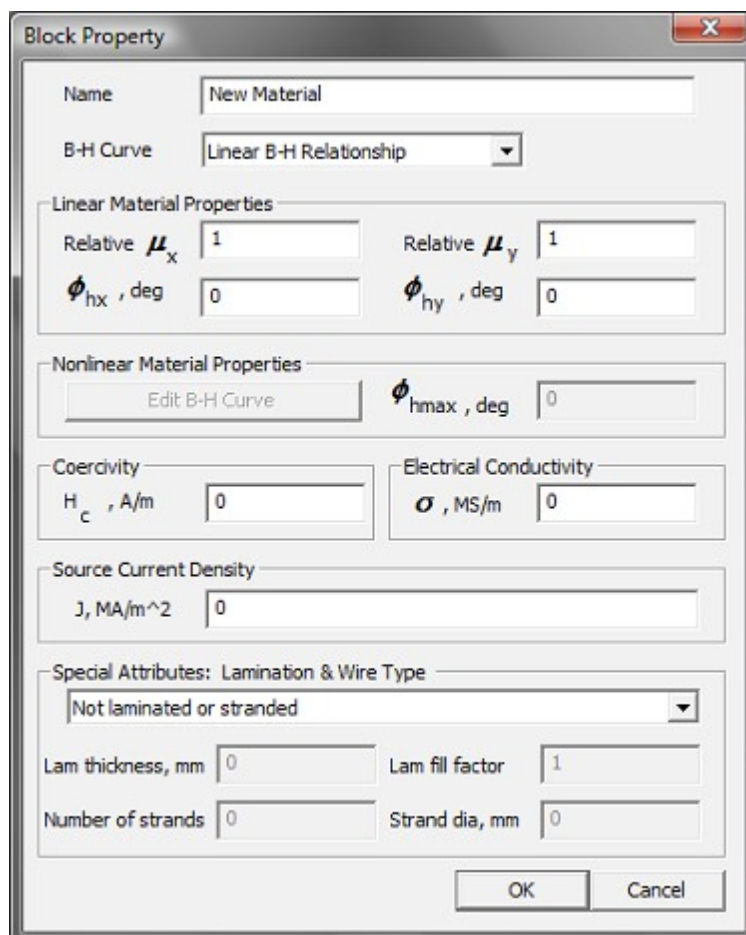
- Air (vzduch – vzduchová mezera, prostor mezi magnety, okolí)
- N36Z_20 (magnetický materiál – magnety)
- 16 AWG (drát – vinutí na statoru)
- 1006 Steel (ocel – hřídel rotoru)
- M19-29G (ocel – materiál statoru a rotoru)

Poznámka: Všechny uvedené materiály byly vybrány po konzultaci s vedoucím.



Obrázek 3.3: Knihovna materiálů

Bohužel materiály N36Z_20 a M19-29G nejsou v knihovně zařazeny, bude je třeba nadefinovat. To provedeme pravým tlačítkem myši v okně knihovny materiálů a zvolením položky „Add New Material“. Otevřením souboru „New Material“ se nám otevře nové okno (obrázek 3.4).



Obrázek 3.4: Okno definování materiálu

Pro magnetický materiál N36Z_20 nadefinujeme pouze tyto vlastnosti:

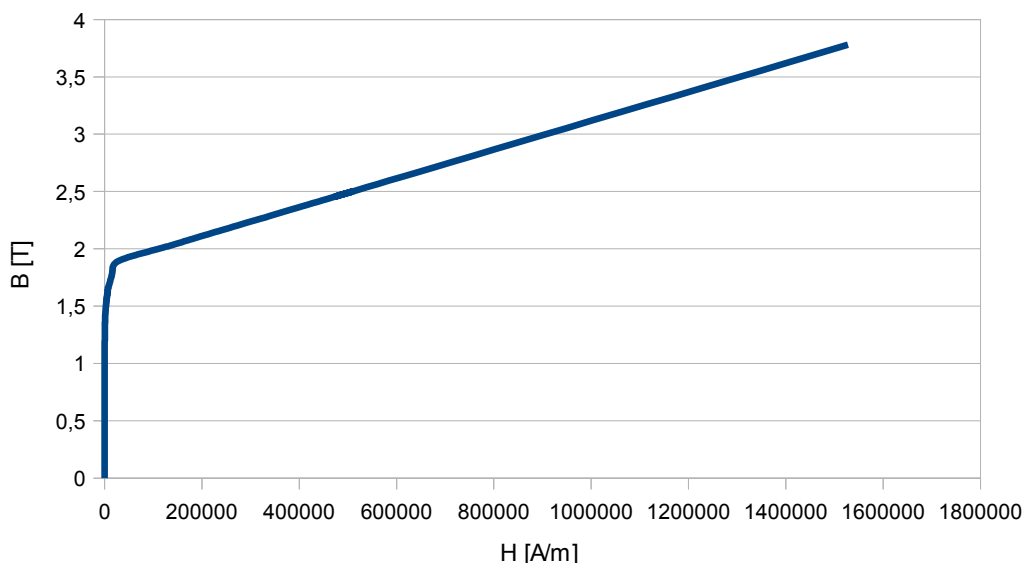
- Relative $\mu_x = \mu_y = 1,03$ (relativní permeabilita)
- Coercivity $H_c = 920000$ A/m (koercivita)

Poznámka: Pro správné určení náhradních parametrů bude potřeba odstranit vliv magnetických indukčních čar magnetů ve vzduchové mezeře. Koercivitu v rámci řešení nastavíme na nulu.

Pro ocel M19-29G:

- Nonlinear B-H Curve (nelineární B-H křivka – obrázek 3.5)
- Electric Conductivity $\sigma = 1,09$ MS/m (elektrická vodivost)
- Laminated in-plane (plošně laminovaný)
- Lam thickness – 0,35 mm (tloušťka)
- Lam fill factor – 0,98 (podíl čistého materiálu od příměsí)

Ostatní údaje zůstanou nezměněny.

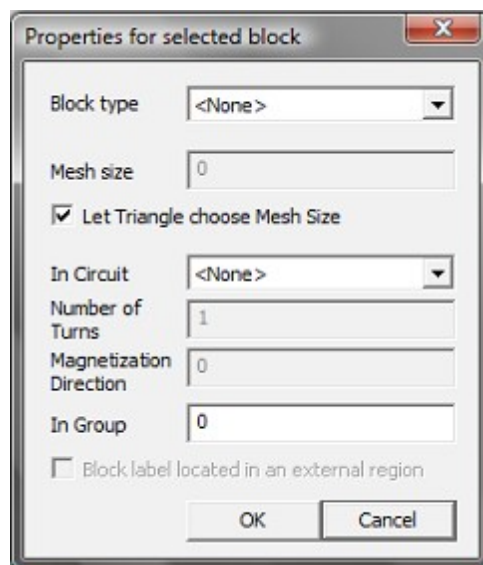


Obrázek 3.5: *B-H křivka materiálu M19_29G*

Poznámka: Křivka na obrázku 3.5 byla vytvořena na základě hodnot ze zdroje [8].

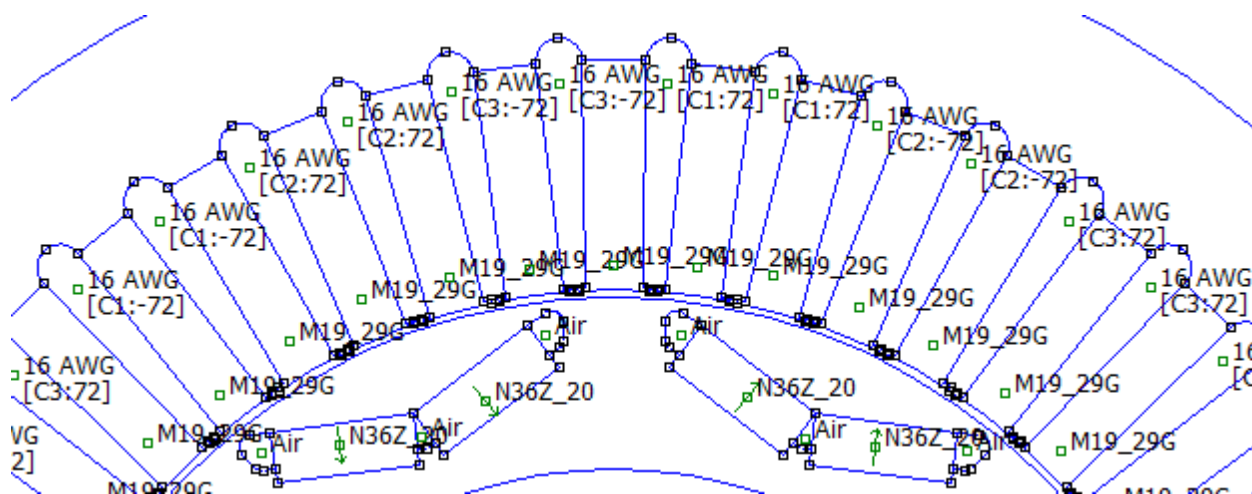
Než se pustíme do umisťování materiálů, nadefinujeme ještě nějaká vedení (v tomto případě vinutí) s proudy. V položce „*Properties*“ → „*Circuits*“ zvolíme v nově otevřeném okně tlačítko „*Add Property*“. Postupně nadefinujeme vinutí s označeními C1, C2 a C3, všechny zatím s proudem o velikosti 0 A.

Materiály rozmístíme pomocí operace „*Block*“ („*Operation*“ → „*Block*“) tak, že pomocí levého tlačítka klikneme kdekoli v dané oblasti, v místě kliknutí se objeví bod s zatím nespécifikovaným materiálem nebo vlastností (viz. obrázek 3.6). Bod označíme pravým tlačítkem myši a pomocí mezerníku (případně volbou položky „*Operation*“ → „*Open Selected*“) otevřeme okno (obrázek 3.5), ve kterém si můžeme zvolit daný materiál („*Block type*“), v případě drátu 16 AWG se určí typ vinutí („*In Circuit*“) a její počet zavitů („*Number of Turns*“), v případě magnetů N36Z_20 určíme směr magnetických indukčních čar („*Magnetization Direction*“). Podle potřeby lze změnit i hustotu síťování („*Mesh size*“) pro přesnější výpočty, to využijeme pouze ve vzduchové mezeře, kde nastavíme hodnotu síťování na 0,25.



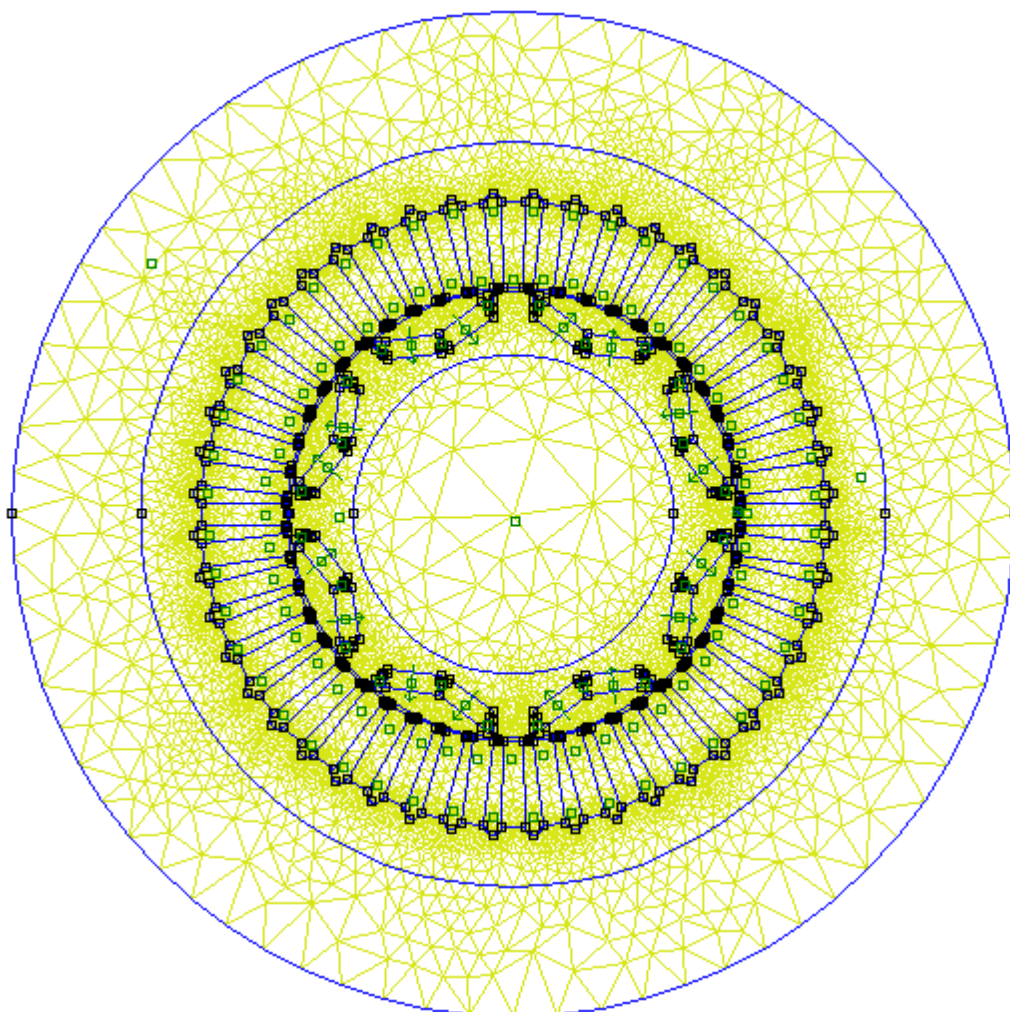
Obrázek 3.6: Vlastnosti bloku

Přibližné rozvržení vinutí (i s počtem závitů) na statoru a natočení magnetů v rotoru nám ukazuje obrázek 3.6.



Obrázek 3.7: Rozvržení vinutí a natočení magnetů

Celkový náhled na model synchronního motoru s permanentními magnety ve FEMMu je na obrázku 3.7. Model je zobrazen se zapnutým síťováním a pro přehlednost nejsou zobrazeny názvy materiálů.



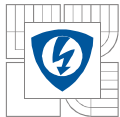
Obrázek 3.8: Model synchronního motoru s permanentními magnety ve FEMMu

Protože se bude během výpočtů ve FEMMu manipulovat hlavně s rotorovou konstrukcí motoru, je vhodné všechny body, resp. uzly („Nodes“) a materiály rotoru zařadit do skupin. To proto, aby se s rotorovou konstrukcí manipulovalo co nejjednodušeji pomocí Lua konzole nebo pomocí Matlab/Octave. Všechny body nejprve označíme a mezerníkem otevřeme okno, kde v položce „In Group“ jako název skupiny uvedeme číslo 1. To samé provedeme i pro materiály, kterým přiřadíme číslo 2.

3.3.2 Výpočty modelu pomocí Octavu

Vytvořený model synchronního motoru nyní podrobíme sérii výpočtů pro různé proudy a různá natočení rotoru. Protože výpočtů bude mnoho, je jednodušší vytvořit program, který se spustí přes Octave a který skrze příkazy OctaveFEMMu umožní dělat další výpočty automaticky.

Cílem programu je provádět výpočty pro natočení rotoru od 0° do 90° po kroku $0,5^\circ$ při protékajících proudech v rozmezí 0 A až 250 A po kroku 10 A a ukládat průběhy absolutní hodnoty magnetické indukce $|B|$, normálové složky magnetické indukce B_n a tangenciální složky magnetické indukce B_t vzduchové mezery.



Kód programu je následující:

```
openfemm                                \\ spustí program FEMM
opendocument("Synchronni_motor.fem")  \\ otevře soubor s tímto označením
M=zeros(25+1,180+1)                    \\ vytvoří nulovou matici M o 26 řadcích
                                        a 181 sloupcích
for i=0:25                              \\ cyklus i
    Ia=i*10                             \\ proud Ia
    for j=0:180                          \\ cyklus j
        J=j/2                           \\ zátěžný úhel J rotoru
        a=J                             \\ fázor a
        b=J-120                         \\ fázor b
        c=J+120                         \\ fázor c

        m=(cos(a*pi/180)+I*sin(a*pi/180))*Ia \\ okamžitá hodnota proudu m
        n=(cos(b*pi/180)+I*sin(b*pi/180))*Ia \\ okamžitá hodnota proudu n
        o=(cos(c*pi/180)+I*sin(c*pi/180))*Ia \\ okamžitá hodnota proudu o

        mi_modifycircprop('C1',1,m)      \\ nastaví proud m ve vinutí C1 modelu
        mi_modifycircprop('C2',1,n)      \\ nastaví proud n ve vinutí C2 modelu
        mi_modifycircprop('C3',1,o)      \\ nastaví proud o ve vinutí C3 modelu

        mi_analyze                       \\ spustí výpočet modelu ve FEMMu
        mi_loadsolution                   \\ zobrazí řešení modelu

        mo_seteditmode('contour')        \\ aktivuje režim kontur
        mo_addcontour(-80.7005,0)        \\ přidá konturu na dané souřadnice
        mo_addcontour(80.7005,0)         \\ přidá konturu na dané souřadnice
        mo_bendcontour(180,1)            \\ ohyb kontury na 180°
        mo_addcontour(-80.7005,0)        \\ přidá konturu na dané souřadnice
        mo_bendcontour(180,1)            \\ ohyb kontury na 180°

        mo_makeplot(1,720,sprintf('B_%.1f°.txt',Ia ,J),0)
        \\ uloží průběh absolutní hodnoty magnetické indukce |B|
        mo_makeplot(2,720,sprintf('B.n_%.1f°.txt',Ia ,J),0)
        \\ uloží průběh normálové složky magnetické indukce B.n
        mo_makeplot(3,720,sprintf('B.t_%.1f°.txt',Ia ,J),0)
        \\ uloží průběh tangenciální složky magnetické indukce B.t

        mo_lineintegral(4) \\ čárový integrál pro výpočet momentu (výstup-dva údaje)
        k=ans(1,1)        \\ specifikuje konkrétní údaj momentu do proměnné k
        M(i+1,j+1)=k      \\ uloží proměnnou k do matice M
        mo_clearcontour   \\ odstraní všechny kontury

        mi_selectgroup(1) \\ označí objekty skupiny 1
        mi_moverotate(0, 0, 0.5) \\ pootočí objekty skupiny 1 o 0,5°
        mi_selectgroup(2) \\ označí objekty skupiny 2
```



```
mi_moverotate(0, 0, 0.5) \\ pootočí objekty skupiny 2 o 0,5°

end \\ konec cyklu j

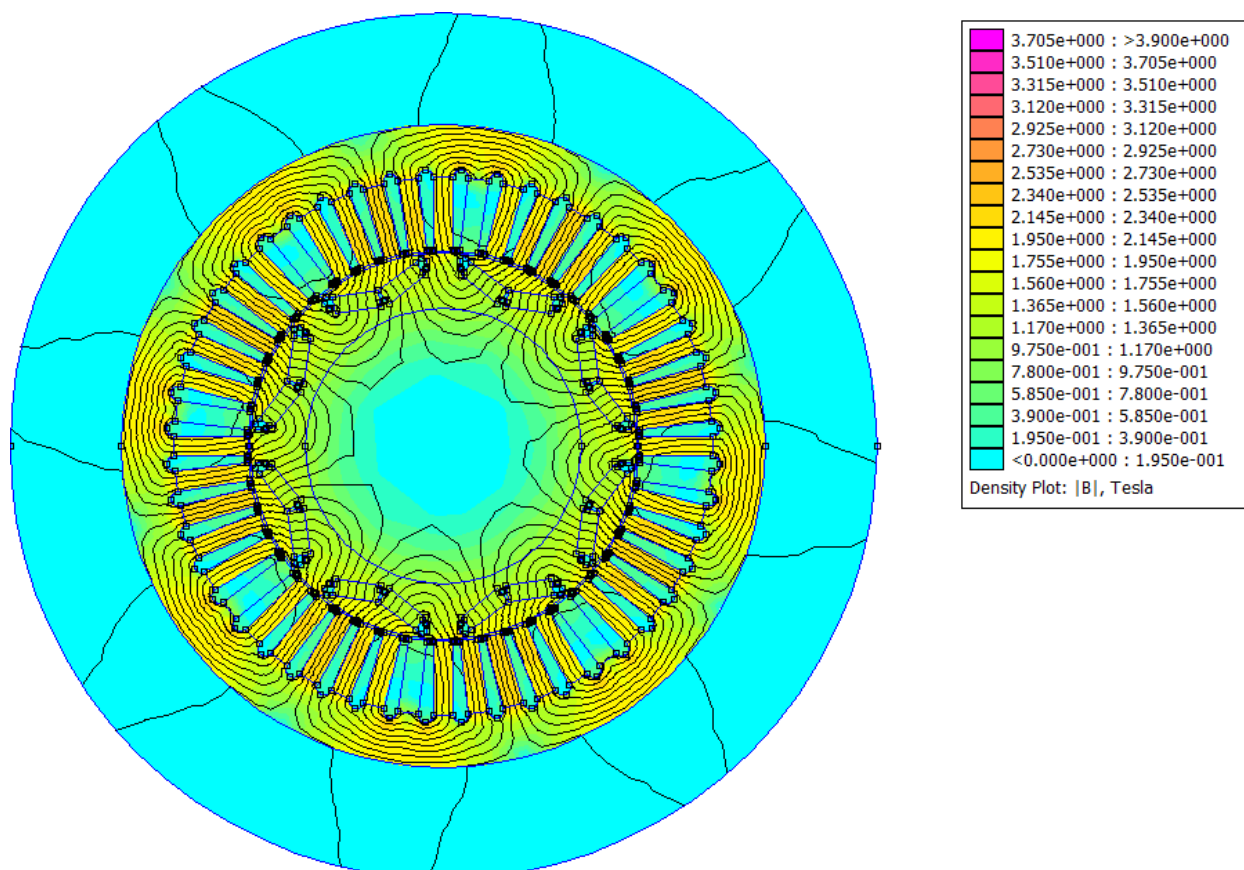
mi_selectgroup(1) \\ označí objekty skupiny 1
mi_moverotate(0, 0, -90.5) \\ pootočí objekty skupiny 1 zpět o 90,5°
mi_selectgroup(2) \\ označí objekty skupiny 2
mi_moverotate(0, 0, -90.5) \\ pootočí objekty skupiny 2 zpět o 90,5°

end \\ konec cyklu i

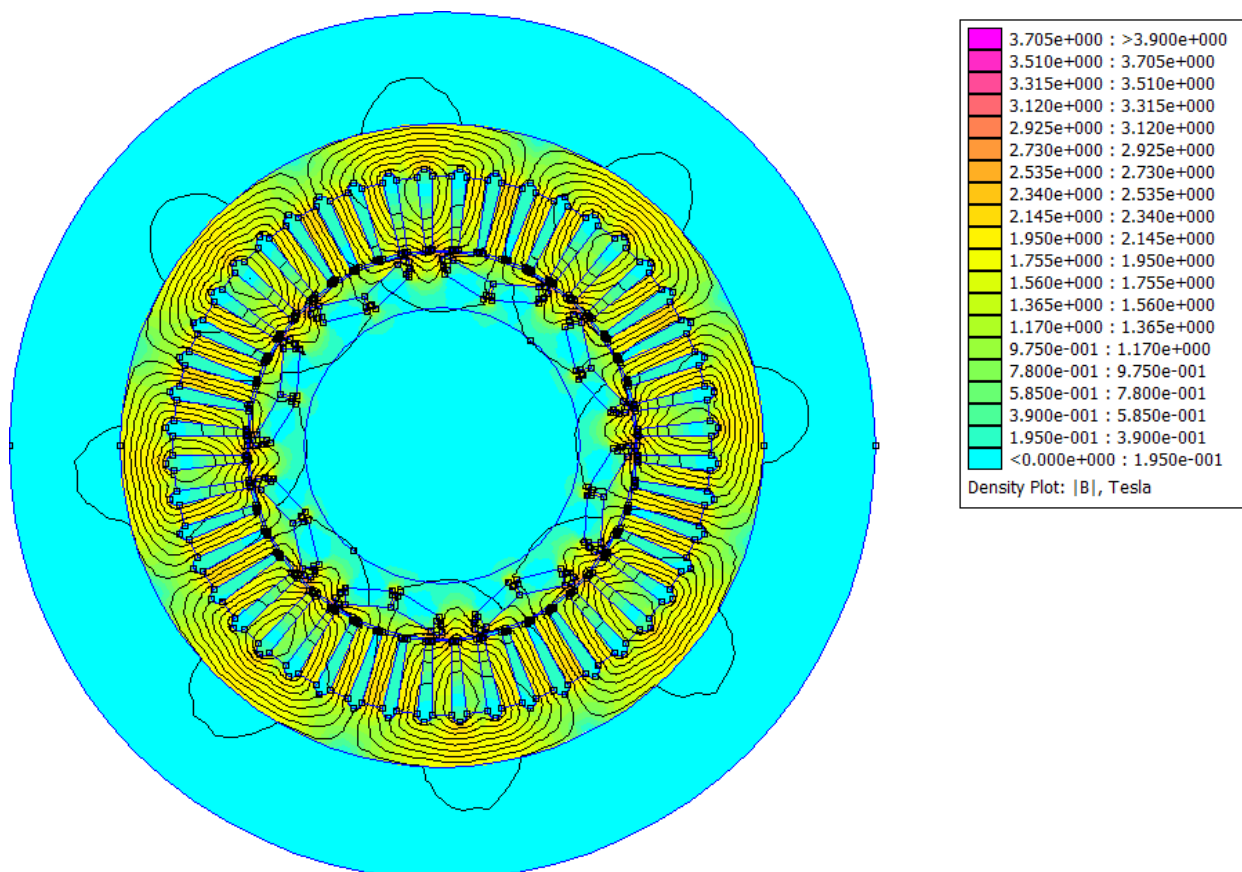
save("moment.txt", "M") \\ uloží konečnou matici M do textového souboru

closefemm \\ zavře program FEMM
```

Výstupem každého výpočtu jsou tedy tři textové soubory. Příklady řešených modelů ve FEMMu jsou zobrazeny na obrázcích 3.8 a 3.9 s rozložením magnetické indukce.



Obrázek 3.9: Řešený model motoru při 120 A s natočením rotoru 0°



Obrázek 3.10: Řešený model motoru při 120 A s natočením rotoru 50°

Poznámka: Modely na obrázcích 3.8 a 3.9 byly řešeny s původní nastavenou hodnotou koercivity použitých magnetů.

4 Simulační parametry motoru a jejich výpočet

Simulačními parametry motoru rozumíme v tomto případě odpor vinutí na statoru R_s , podélnou indukčnost L_d a příčnou indukčnost L_q .

4.1 Odpor vinutí na statoru R_s

Odpor vinutí na statoru R_s se vypočítá dle vztahu:

$$R_s = \rho \frac{l}{S} \quad (4.1)$$

kde průřez drátu S je

$$S = \frac{\pi d^2}{4} \quad (4.2)$$

Dosažením vztahu 5.2 bude výsledný vztah:

$$R_s = \rho \frac{4l}{\pi d^2} \quad (4.3)$$

Hodnoty pro dosažení jsou následující:

$$\rho_{Cu} = 1,69 \cdot 10^{-8} \Omega m ; l = 22,98 m ; d = 1,291 mm$$

Poznámka: Vinutí (resp. drát) je z mědi, uvedená hodnota rezistivity ρ je tabulková hodnota při teplotě 20°C. Délka drátu l je určena na základě rozměrů motoru. Průměr drátu d je dán použitým typem drátu (16 AWG).

Velikost odporu R_s je tedy:

$$R_s = \rho \frac{4l}{\pi d^2} = 1,69 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{4 \cdot 22,98}{\pi \cdot (1,291 \cdot 10^{-3})^2} = 0,297 \Omega$$

4.2 Podélná indukčnost L_d a příčná indukčnost L_q

Informace uvedené v této kapitole byly čerpány z literatury [6].

4.2.1 Podélná indukčnost L_d

Podélná indukčnost L_d se dá určit několika způsoby pomocí výpočtů z řešeného modelu.

Způsoby výpočtu:

- pomocí magnetické energie
- pomocí magnetického toku
- pomocí magnetické indukce ve vzduchové mezeře

V této práci se budeme zabývat výpočtem pomocí magnetické indukce ve vzduchové mezeře.

4.2.1.1 Výpočet indukčnosti L_d pomocí magnetické indukce ve vzduchové mezeře

Z daného řešeného modelu je možné získat průběh normální složky magnetické indukce ve vzduchové mezeře $B_{gn}(\vartheta_r)$, kde ϑ_r udává úhel (polohu) rotoru vyjádřený v elektrických radiánech vůči pólové ose. Základní harmonická magnetické indukce s ohledem na podélnou osu je dána vztahem:

$$B_{ldm} = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} B_{gn}(\vartheta_r) \cos(\vartheta_r) d\vartheta_r \quad (4.4)$$

Jestli je průběh normální složky magnetické indukce $B_{gn}(n)$ vyjádřen v N_p bodech, bude platit vztah

$$B_{ldm} = \frac{2}{N_p} \sum_{n=1}^{N_p} B_{gn}(n) \cos(n \Delta \vartheta) \Delta \vartheta \quad (4.5)$$

kde $\Delta\vartheta = \pi / N_p$ (bráno v ohledu na jeden pól motoru).

Tok dostaneme z hodnoty magnetické indukce jako střední hodnotu sinusoidního průběhu (základní harmonické) po povrchu odpovídající jednomu pólu. Hodnota podélného magnetického toku potom je:

$$\Lambda_d = B_{\text{ldm}} \frac{k_w N}{2} \frac{D L_{Fe}}{p} \quad (4.6)$$

Podélnou indukčnost L_d vypočteme dle vztahu

$$L_d = \frac{\Lambda_d}{I_M} \quad (4.7)$$

4.2.2 Příčná indukčnost L_q

Stejně jako u podélné indukčnosti platí uvedené způsoby výpočtu i pro příčnou indukčnost L_q a opět použijeme výpočet pomocí magnetické indukce ve vzduchové mezeře.

4.2.2.1 Výpočet indukčnosti L_q pomocí magnetické indukce ve vzduchové mezeře

Základní harmonická magnetické indukce

$$B_{1qm} = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} B_{gn}(\vartheta_r) \sin(\vartheta_r) d\vartheta_r \quad (4.8)$$

vyjádřená v N_p bodech

$$B_{1qm} = \frac{2}{N_p} \sum_{n=1}^{N_p} B_{gn}(n) \sin(n \Delta\vartheta) \Delta\vartheta \quad (4.9)$$

Magnetický tok

$$\Lambda_q = B_{1qm} \frac{k_w N}{2} \frac{D L_{Fe}}{p} \quad (4.10)$$

Příčná indukčnost L_q

$$L_q = \frac{\Lambda_q}{I_M} \quad (4.11)$$

4.3 Výpočet indukčností L_d a L_q v Octavu

K určení indukčností využijeme textových souborů normálových složek magnetické indukce získaných z řešení modelu pomocí Octavu (viz. Kap. 3.3.2). Protože se bude jednat opět o velké množství výpočtů, zjednodušíme výpočty pomocí programu v Octavu, v němž použijeme vztahy 4.5 – 4.7 a 4.9 – 4.11. U vztahů pro výpočet magnetického toku (vztahy 4.6 a 4.10) dosadíme přímo do programu hodnoty těchto veličin:

$k_w = 0,9$ – koeficient vinutí

$N = 72$ – počet závitů

$D = 160,401$ mm – vnější průměr rotoru

$L_{Fe} = 83,566$ mm – délka motoru

$p = 4$ – počet pólových dvojic

Kód programu v Octavu je potom následující:

```
L=zeros(4706,4);      %% vytvoření nulové matice L o 4706 řádcích a 4 sloupcích

q=158;                %% parametr q
m=203;                %% parametr m

for i=1:25             %% cyklus i
    Im=i*10;           %% proud Im
    for j=0:180         %% cyklus j
        J=j*10/2;      %% proměnná J

        s=load(sprintf('B.ne_%dA_%.1f.txt',Im , J));
        %% načtení příslušného textového souboru v rámci cyklu

        Bdm=0;          %% proměnná Bdm
        Bqm=0;          %% proměnná Bqm

        for n=0:89      %% cyklus n
            e=q+n        %% proměnná e závislá na cyklu n
            B=s(e,2);    %% načtení příslušného řádku z aktuálního souboru
            Bdm=Bdm+B(n)*cos(n*pi/90)*(pi/90); %% podle vzorce 4.5

        end;            %% konec cyklu

        for n=0:89      %% cyklus n
            e=m+n        %% proměnná e závislá na cyklu n
            B=s(e,2);    %% načtení příslušného řádku
            Bqm=Bqm+B(n)*sin(n*pi/90)*(pi/90); %% podle vzorce 4.9

        end;            %% konec cyklu

        Bldm=Bdm*2/90;  %% pokračování vzorce 4.5
        Blqm=Bqm*2/90;  %% pokračování vzorce 4.9

        tokd=(0.9*72*Bldm*0.160401*0.083566)/8; %% vzorec 4.6
        tokq=(0.9*72*Blqm*0.160401*0.083566)/8; %% vzorec 4.10

    Ld=tokd/Im;         %% vzorec 4.7
    Lq=tokq/Im;         %% vzorec 4.11
```

```
k=181*(i-1)+(j+1);    %% proměnná k

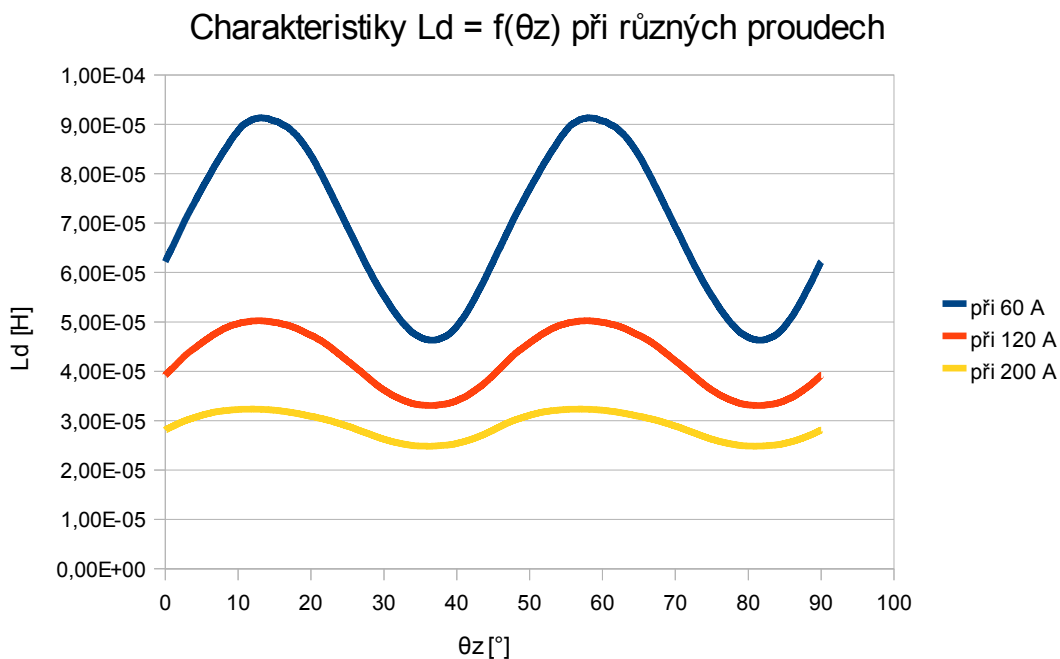
L(k,1)=Ld;            %% umístění Ld na „k“ řádku v prvním sloupci L matice
L(k,2)=Lq;            %% umístění Lq na „k“ řádku v druhém sloupci L matice
L(k,3)=Im;            %% umístění Im na „k“ řádku v třetím sloupci L matice
L(k,4)=j/2;           %% umístění úhlu na „k“ řádku v čtvrtém sloupci L matice

end;                  %% konec cyklu j
end;                  %% konec cyklu i

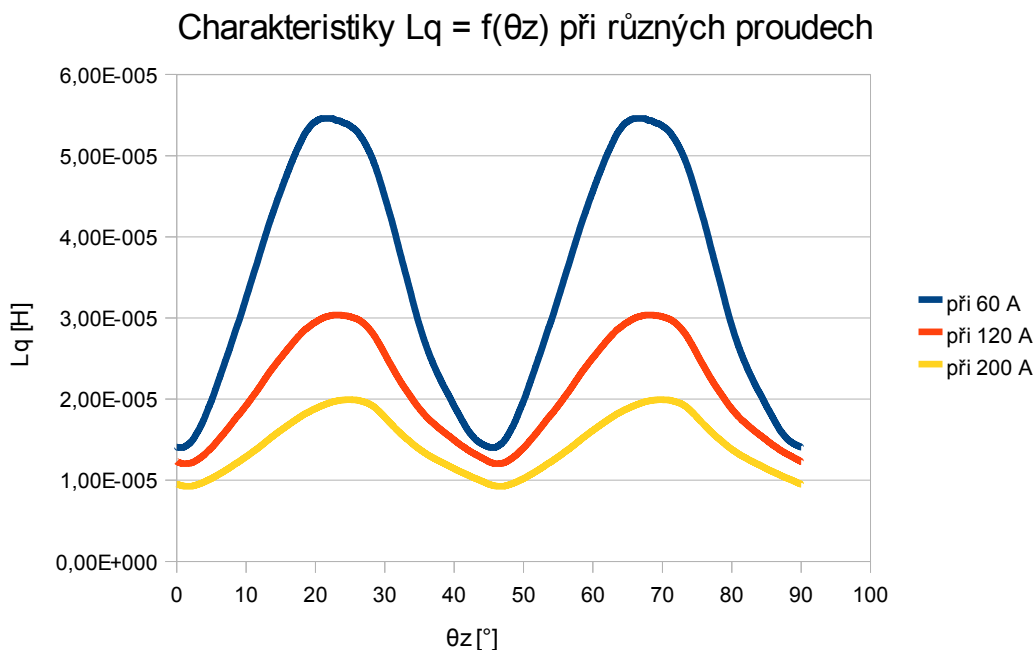
save("Ld_Lq.txt","L");    %% uložení matice L do textového souboru
```

Poznámka: Průběhy normálových magnetických indukcí jsou tvořeny 720 body, počet pólů v rotoru je 8, přepočet počtu bodů N_p na jeden pól je $720/8$ tedy $N_p = 90$. Parametry „ m “ a „ q “ charakterizují polohu kladné půlperiody (resp. kterými body je přesně tvořena) průběhu normálové složky magnetické indukce.

Grafy závislostí L_d a L_q na zatěžném úhlu θ_z při proudech 60 A, 120 A a 200 A jsou znázorněny na obrázcích 4.1 a 4.2.



Obrázek 4.1: Průběhy podélné indukčnosti L_d



Obrázek 4.2: Průběhy příčné indukčnosti L_q

5 Simulink

V této sekci si v Matlabu Simulink nasimulujeme nějaké průběhy proudů I_d a I_q a úhlové rychlosti ω matematického modelu synchronního motoru s permanentními magnety bez žádných řídicích či regulačních soustav, ale abychom to mohli provést, potřebujeme napětí a proudy přetransformovat z klasického fázového označení (a, b, c) do souřadné soustavy rotoru „r“ (d, q). K tomuto účelu využijeme Parkovy transformace a dalších případných transformací uvedených níže (informace a rovnice čerpány z literatury [4]).

5.1 Parkova transformace

Parkova transformace je lineární metoda zjednodušení modelu motoru, kde pomocí prostorových vektorů přeměníme trojfázovou soustavu na ekvivalentní dvoufázový model. Za předpokladu nepřipojeného nulového vodiče motoru (symetrický zdroj napětí) platí:

$$u_a + u_b + u_c = 0; \quad i_a + i_b + i_c = 0 \quad (5.1 - 5.2)$$

Podmínka symetrie bude tak platit i pro ostatní veličiny a počet diferenciálních rovnic se tak sníží na 2/3 (bez vlivu nulových složek). Při této transformaci se volí konstanty $K_d = K_q = 2/3$, $K_0 = 1/3$ a s jejich využitím dostaneme následující vztahy.

Parkova transformace pro proud (do souřadného systému statoru s (α, β)):

$$i_s = i_{s\alpha} + j i_{s\beta} = \frac{2}{3} (i_a + i_b e^{-j\frac{2\pi}{3}} + i_c e^{j\frac{2\pi}{3}})$$

$$i_s = \frac{2}{3} [i_a + |i_b|(\cos(-\frac{2\pi}{3}) + j \sin(-\frac{2\pi}{3})) + |i_c|(\cos\frac{2\pi}{3} + j \sin\frac{2\pi}{3})]$$

$$i_s = \frac{1}{3} (2i_a - i_b - i_c) + j \frac{\sqrt{3}}{3} (-i_b + i_c) \quad (5.3)$$

$$\text{tj. } i_{s\alpha} = \frac{1}{3} (2i_a - i_b - i_c) ; i_{s\beta} = \frac{\sqrt{3}}{3} (-i_b + i_c) \quad (5.4 - 5.5)$$

Při splnění podmínek symetrie (vztah 5.1 – 5.2) platí:

$$i_{s\alpha} = i_a ; i_{s\beta} = -\frac{2}{\sqrt{3}} (0,5i_a + i_b) \quad (5.6)$$

Zpětná transformace:

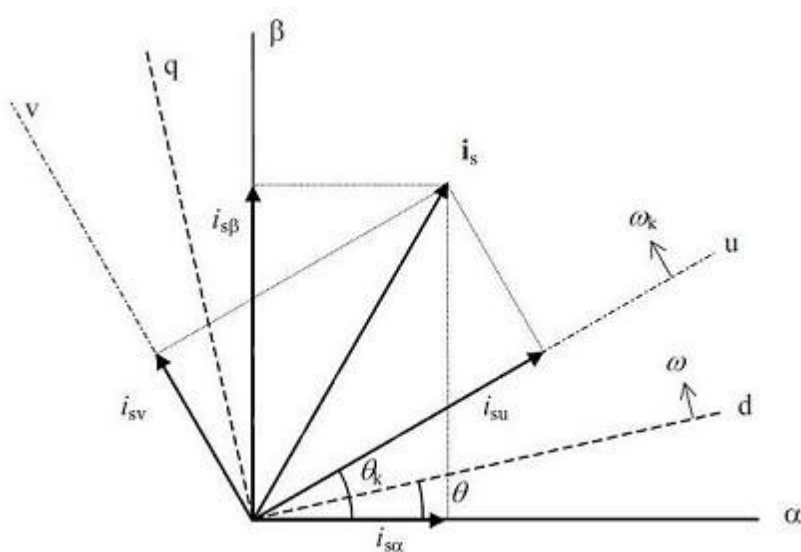
$$i_a = i_{s\alpha} + i_0 ; i_b = (-\frac{1}{2} i_{s\alpha} - \frac{\sqrt{3}}{2} i_{s\beta}) + i_0 ; i_c = (-\frac{1}{2} i_{s\alpha} + \frac{\sqrt{3}}{2} i_{s\beta}) + i_0 \quad (5.7 - 5.9)$$

kde i_0 je nulová složka proudu, pro kterou platí následující vztah:

$$i_0 = \frac{1}{3} (i_a + i_b + i_c) \quad (5.10)$$

Při splnění podmínek symetrie je nulová složka rovna nule, což lze dokázat dosazením vztahu 5.2 do vztahu 5.10.

Prostorové vektory se dají vyjádřit i v jiných komplexních rovinách (souřadných soustavách) – viz. Obrázek 5.1 a Tabulka 5.1.



Obrázek 5.1: Prostorový vektor proudu v souřadných soustavách [4]

Komplexní rovina	Úhlová rychlost	Označení os	Název souřadné soustavy
s	0	α, β	spojený se statorem
p	ω_s	x, y	spojený s magnetickým polem
r	ω	d, q	spojený s rotorem
k	ω_k	u, v	rotující všeobecnou úhlovou rychlostí

Tabulka 5.1: Souřadné soustavy [4]

Transformace prostorového vektoru ze statorového souřadného systému s (α, β) do rotorového r (d, q):

$$i_s^r = i_{sd} + j i_{sq} = |i_s| e^{-j\theta} = (i_{s\alpha} + j i_{s\beta}) [\cos(-\theta) + j \sin(-\theta)]$$

$$i_s^r = (i_{s\alpha} + j i_{s\beta}) (\cos\theta - j \sin\theta) = i_{s\alpha} \cos\theta + i_{s\beta} \sin\theta + j(-i_{s\alpha} \sin\theta + i_{s\beta} \cos\theta) \quad (5.11)$$

$$\text{tj. } i_{sd} = i_{s\alpha} \cos\theta + i_{s\beta} \sin\theta ; \quad i_{sq} = (-i_{s\alpha} \sin\theta + i_{s\beta} \cos\theta) \quad (5.12 - 5.13)$$

Zpětná transformace:

$$i_s^s = i_{s\alpha} + j i_{s\beta} = \frac{|i_s^r|}{e^{-j\theta}} = |i_s^r| e^{j\theta} = (i_{sd} + j i_{sq}) (\cos\theta + j \sin\theta)$$

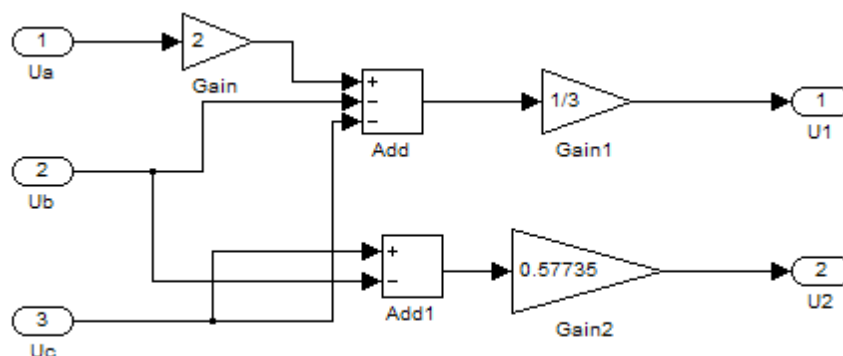
$$i_s^s = i_{sd} \cos\theta - i_{sq} \sin\theta + j(-i_{sq} \cos\theta + i_{sd} \sin\theta) \quad (5.14)$$

$$\text{tj. } i_{s\alpha} = i_{sd} \cos\theta - i_{sq} \sin\theta ; \quad i_{s\beta} = (-i_{sq} \cos\theta + i_{sd} \sin\theta) \quad (5.15 - 5.16)$$

Poznámka: Všechny tvary uvedených rovnic platí rovněž i pro napětí.

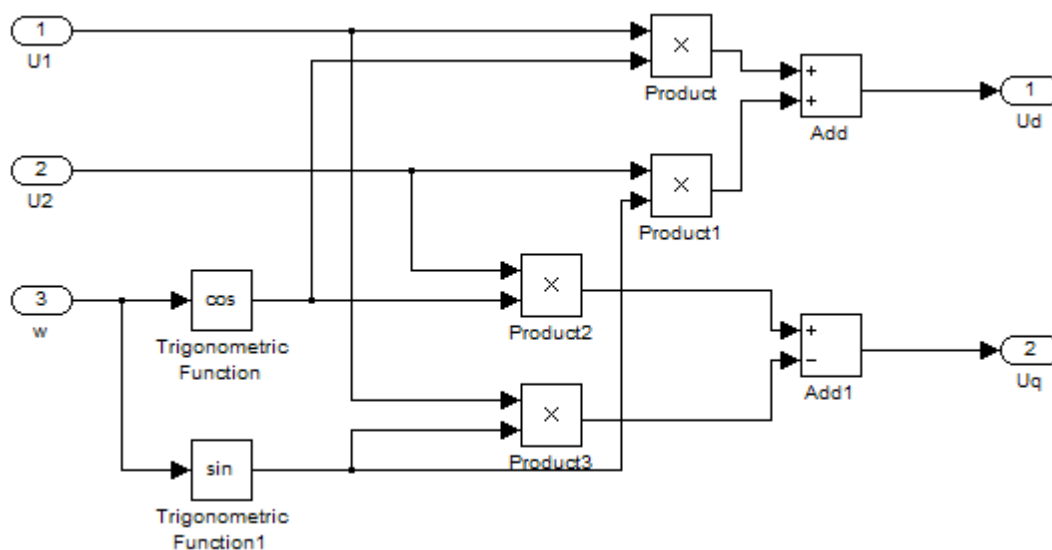
5.2 Blokové schéma

Celkové blokové schéma se bude skládat ze tří hlavních částí (subsystémů), přičemž dvě z nich jsou zaměřené na transformaci napájecích napětí. Na obrázku 5.2 vidíme subsystém Parkovy transformace podle rovnic 5.4 a 5.5.



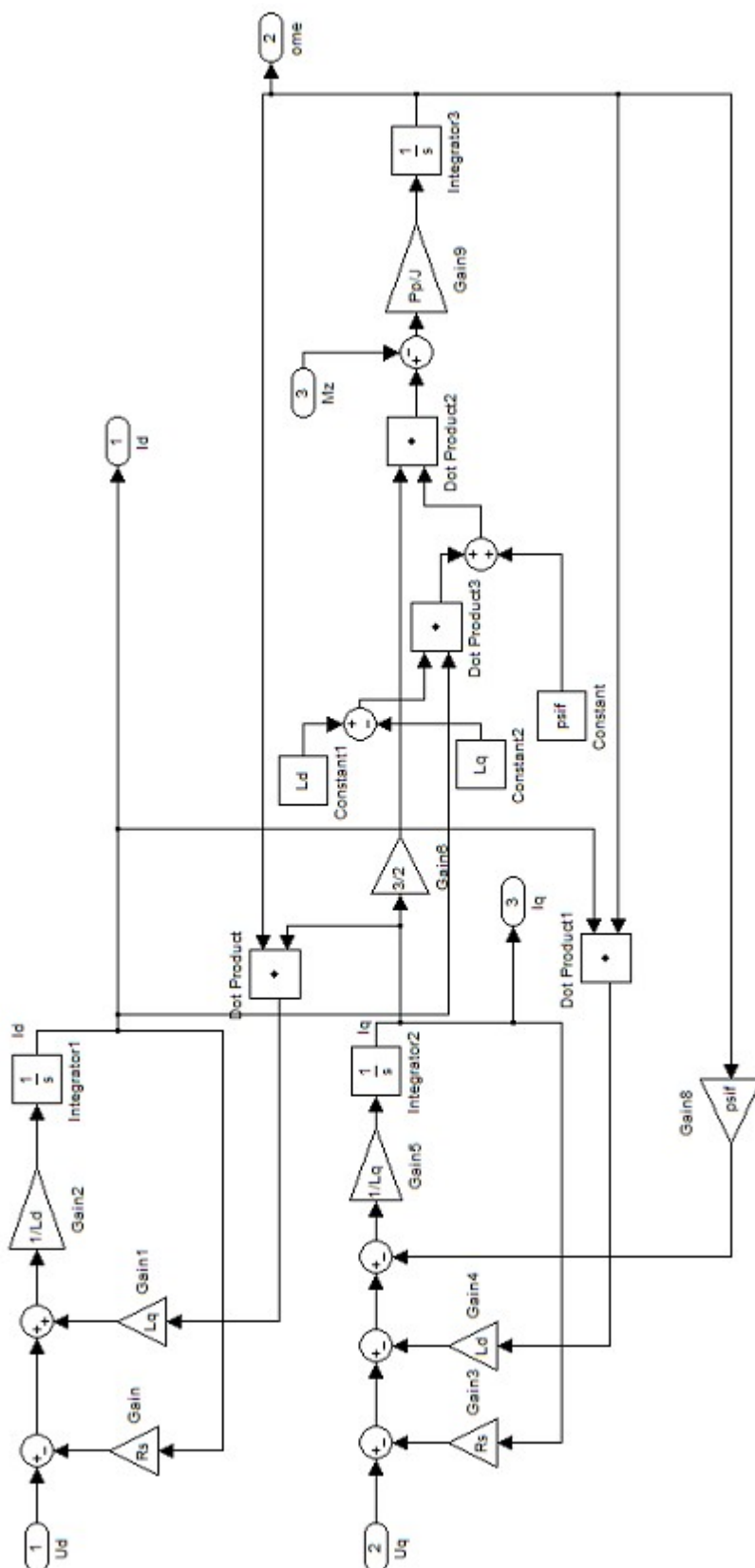
Obrázek 5.2: Subsystém Parkovy transformace v Simulinku

Obrázek 5.3 znázorňuje subsystém transformace do rotorového souřadného systému podle rovnic 5.12 a 5.13.



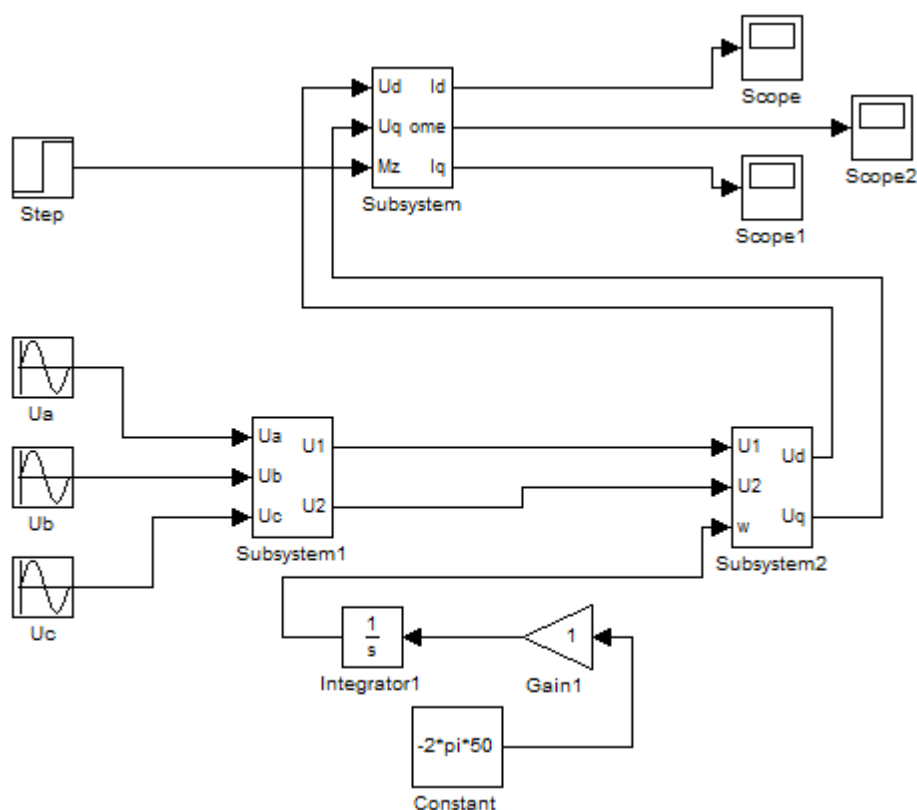
Obrázek 5.3: Subsystém pro transformaci do rotorového souřadného systému

Třetím a posledním subsystémem je samotný matematický model motoru znázorněným na obrázku 5.4.



Obrázek 5.4: Matematický model synchronního motoru s permanentními magnety

Kompletní blokové schéma v Simulinku je na obrázku 5.5.



Obrázek 5.5: Kompletní blokové schéma v Simulinku

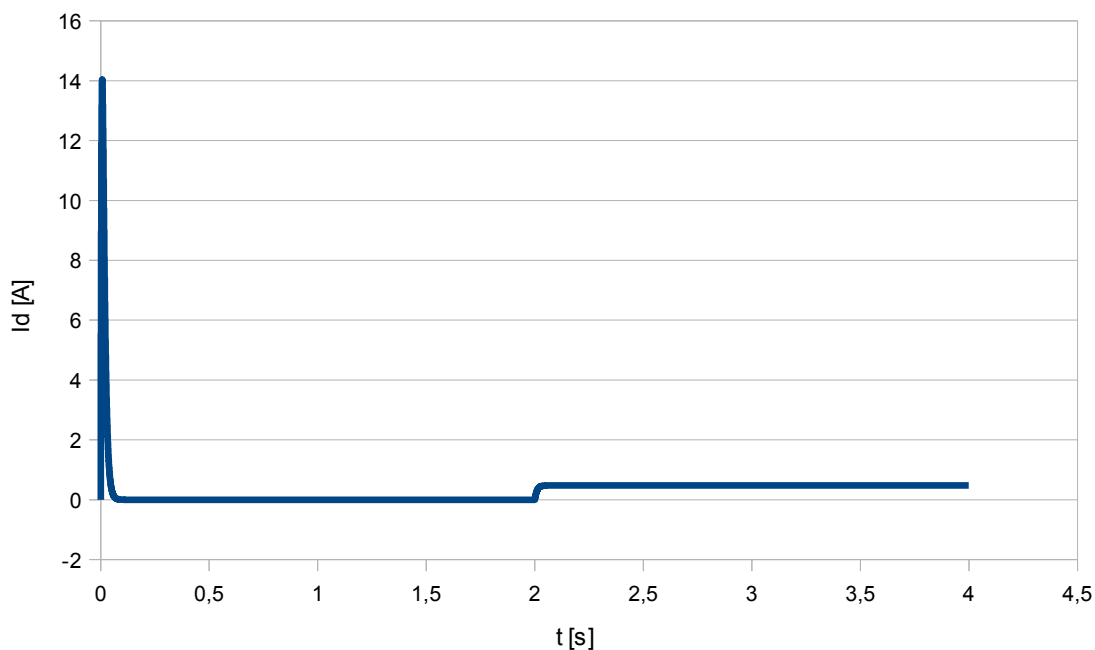
5.3 Simulace

Nyní nasimulujeme časové průběhy proudů I_d a I_q a úhlové rychlosti ω podle blokového schématu na obrázku 5.5 pro tyto parametry motoru :

$L_d = 68,8 \text{ } \mu\text{H}$ – podélná indukčnost
 $L_q = 34,3 \text{ } \mu\text{H}$ – příčná indukčnost
 $R_s = 0,3 \text{ } \Omega$ – odpor vinutí na statoru
 $J_c = 0,05 \text{ kg m}^2$ – moment setrvačnosti
 $\Psi_f = 0,5$ – spřažený budící tok
 $p = 4$ – počet pólových dvojic

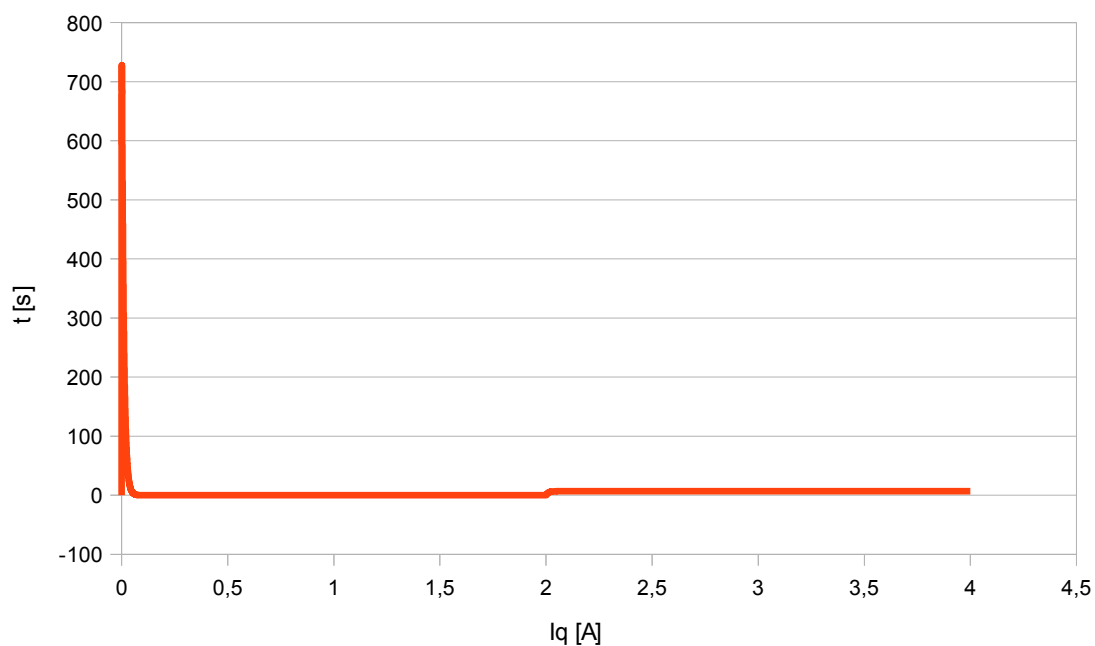
Matematický model motoru bude napájen symetrickým zdrojem napětí (U_a , U_b , U_c s harmonickými sinusovými průběhy o amplitudách 230 V a frekvencích 50 Hz) a po určitém časovém úseku bude motor zatížen momentem M_z . Dané nasimulované průběhy vidíme v grafech na obrázcích 5.6 až 5.8.

Charakteristika $I_d = f(t)$ simulovaného modelu motoru

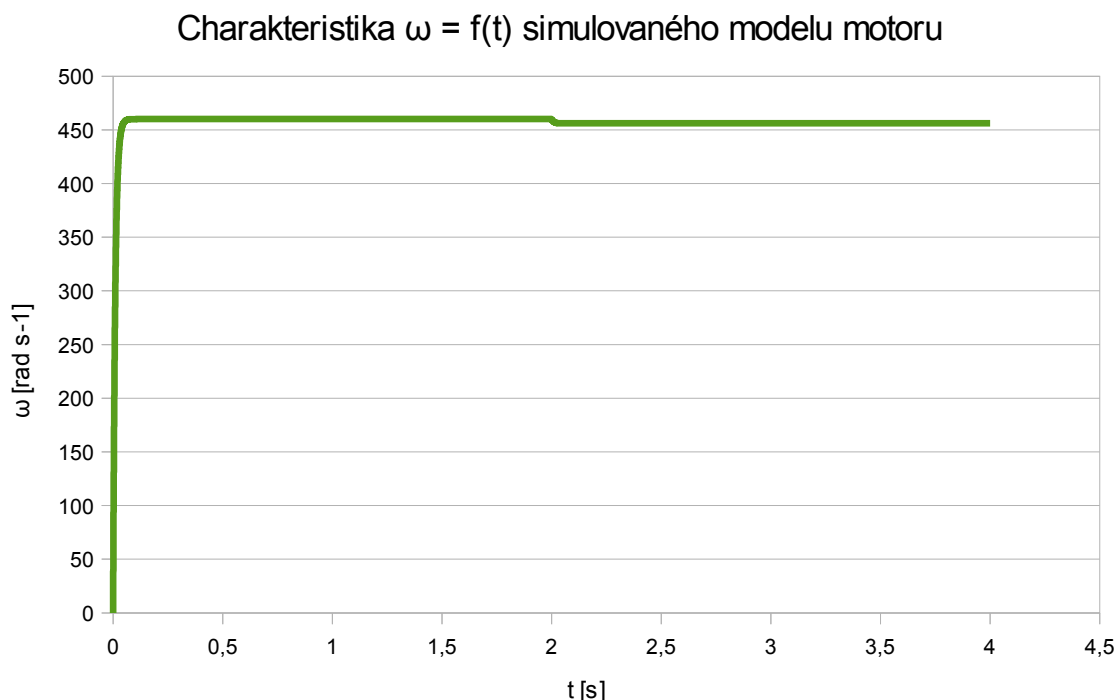


Obrázek 5.6: Graf nasimulovaného časového průběhu proudu I_d motoru

Charakteristika $I_q = f(t)$ simulovaného modelu motoru



Obrázek 5.7: Graf nasimulovaného časového průběhu proudu I_q motoru



Obrázek 5.8: Graf nasimulovaného časového průběhu úhlové rychlosti ω motoru

6 Závěr

Určovali jsme náhradní parametry synchronního motoru s permanentními magnety pomocí metody konečných prvků. Seznámili jsme se s jeho konstrukcí a s jeho matematickým modelem. Vytvořili jsme jeho model ve FEMMu, který se v něm řešil pomocí metody konečných prvků pro různé proudy a různé zátěžné úhly (tj. pro různé situace). Z výsledků se potom určila podélná indukčnost L_d a příčná indukčnost L_q z normálové složky magnetické indukce ve vzduchové mezeře. Pro vybrané parametry jsme nasimulovali pár průběhů v Matlabu Simulink.

Na obrázcích 4.1 a 4.2 jsou znázorněny grafy podélné indukčnosti L_d a příčné indukčnosti L_q závislé na úhlu zatížení θ_z pro tři vybrané proudy. Samotné charakteristiky by se měly blížit sinusovému průběhu, který by se měl se zvyšujícím se proudem postupně vyhlazovat. V našem případě je sice průběh deformovaný, ale vyhlazování je patrné i zde se stoupajícím proudem. Deformace průběhu je zřejmě způsobena chybou metody.

Grafy nasimulovaných závislostí proudů I_d , I_q a úhlové rychlosti ω na čase t jsou znázorněny na obrázcích 5.6 – 5.8. Charakteristiky můžeme rozdělit do tří úseků.

Prvním úsekem je rozběh motoru, který se vyznačuje vysokým, ale časově krátkým, záběrným proudem během prvních milisekund a zvyšující se úhlové rychlosti motoru. Zatímco proud I_d dosahuje pár desítek ampér při rozběhu, proud I_q dosahuje několika stovek ampér.

Druhým úsekem je chod motoru, při kterém jsou proudy a otáčky ustálené.

Posledním úsekem je zatížení motoru momentem, při kterém dojde k určitému poklesu (záleží na velikosti momentu) otáček motoru a určitému vzrůstu proudů.

Literatura

- [1] PYRÖNEN, Juha; JOKINEN, Tapani; HRABOVCOVÁ, Valéria. *Design of Rotating Electrical Machines*. John Wiley & Sons, Ltd., 2008. 512 s. ISBN:978-0-470-69516-6
- [2] MEEKER, David. *Finite Element Method Magnetics Version 4.2, User's Manual*, 2007
- [3] MEEKER, David. *Finite Element Method Magnetics: OctaveFEMM Version 1.2. User's Manual*, 2006
- [4] NEBORÁK, Ivan. *Modelování a Simulace Elektrických Regulovaných Pohonů*. Ostrava: VŠB, 2002. 172 s.
- [5] HSU, J. S.; AYERS, C. W.; COOMER, C. L. *Report on Toyota/Prius Motor Design and Manufacturing Assessment*. Oak Ridge National Laboratory, 2004.
- [6] BIANCHI, N. *Electrical Machine Analysis Using Finite Elements*, CRC Press, Boca Raton, 2005.
- [7] MICHALICZEK, Jan. *Analýza náhradních parametrů elektrických strojů pomocí metody konečných prvků*, Brno: VUT v Brně, FEKT, 2011. 44 s.
- [8] *Study of Permanent Magnet Motor with MAXWELL 2D: Example of the 2004 Prius IPM Motor* [online]. [cit. 2011-05-20].
Dostupný z WWW: <<http://docin.com/p-34272587.html>>